



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Fisica e Astronomia “Galileo Galilei”

Corso di Laurea in Fisica

Tesi di Laurea

Moto di gocce di ferrofluido su piano inclinato soggette a un campo magnetico esterno

Relatore

Prof. Giampaolo Mistura

Laureando

Mattia Carneri

Anno Accademico 2017/2018

Riassunto

Questa tesi presenta i risultati del lavoro svolto presso il Laboratorio di Fisica delle Superfici e Interfacce (*LaFSI*) di Padova riguardante il controllo del moto di gocce di ferrofluido su piano inclinato attraverso campi magnetici variabili. Il lavoro parte da presupposti di microfluidica aperta riguardanti il controllo attivo e passivo del moto di gocce in generale e del moto di gocce di ferrofluido, in particolare attraverso l'utilizzo di una *LIS* dove far scorrere la goccia. La novità introdotta dallo studio è l'utilizzo di un elettromagnete per generare campi magnetici variabili. Il risultato è il controllo completo del moto della goccia di ferrofluido che può scendere, risalire e restare immobile sul piano inclinato in base all'intensità del campo magnetico.

Indice

Introduzione	1
1.Controllo del moto di gocce sessili.....	2
1.1 Controllo passivo.....	2
1.2 Controllo attivo.....	5
2.Apparato sperimentale	6
2.1 Elettromagnete.....	6
2.2 Ferrofluido	8
2.3 Substrato	8
2.4 Protocollo di misura	9
3.Risultati sperimentali	11
3.1 Misure con acido nitrico.....	11
3.2 Misure lungo il piano orizzontale.....	12
3.3 Misure lungo il piano inclinato	14
3.3.1 Spigolo appoggiato all'espansione	14
3.3.2 Faccia appoggiata all'espansione.....	16
Conclusioni	19
Bibliografia	20

Introduzione

La microfluidica aperta [1] è la branca della microfluidica inerente lo scorrimento di gocce su superfici aperte. In letteratura sono presenti articoli che riguardano il controllo del moto di gocce in modo passivo attraverso l'utilizzo di *CHS* [1,2,3,4,5], *LIS* [1,2,3,4,5] e *MAGSS* [6], e in modo attivo attraverso oscillazioni meccaniche [7], l'*elettro-wetting* [8] e il *magneto-wetting* [9]. Nel nostro caso vengono prese in esame gocce di ferrofluido magnetico: una sospensione colloidale stabile di un sottoinsieme di particelle magnetiche in un liquido vettore. In particolare le particelle magnetiche sono di maghemite $\gamma\text{-FeO}_3$ in sospensione in una soluzione di acido nitrico HNO_3 . Sono stati pubblicati articoli che riguardano la modifica della forma delle gocce di ferrofluido [10] e del controllo del moto attraverso magneti permanenti [9], ma l'azione di un campo variabile è ancora inesplorata. In laboratorio è presente un elettromagnete con cui si può controllare l'intensità del campo magnetico tra le due espansioni dell'elettromagnete. Utilizzando tale strumento è iniziata l'esplorazione dei fenomeni magnetici che possono avvenire su gocce sessili di ferrofluido. In particolare le gocce sono fatte scorrere su una LIS fabbricata in laboratorio e lungo un piano inclinato di 30° . Lo studio ha dimostrato che si può controllare completamente il moto di una goccia su un piano inclinato modificando il campo magnetico applicato. In questa tesi vengono presentati i risultati del lavoro svolto presso il Laboratorio di Fisica delle Superfici e Interfacce (*LaFSI*) di Padova, inerenti l'influenza di un campo magnetico variabile esterno su gocce di ferrofluido in moto su un piano inclinato. L'elaborato è strutturato come segue:

- il Capitolo 1 esplora lo studio del controllo del moto di gocce sessili e presenta i risultati raggiunti finora in questo ambito;
- il Capitolo 2 descrive la messa appunto dell'apparato e la sua composizione, la procedura di misura e gli strumenti utilizzati per l'analisi;
- il Capitolo 3 analizza i risultati sperimentali e ne dà un'interpretazione fisica.

CAPITOLO 1

Controllo del moto di gocce sessili

In questo capitolo sono elencati i possibili metodi per influenzare il moto di gocce sessili: si parte dal controllo passivo attraverso le superfici chimicamente eterogenee (*Chemically Heterogeneous Surfaces, CHS*), le superfici impregnate di lubrificante (*Lubricant Impregnated Surfaces, LIS*) e superfici scivolose magnetiche (*Magnetic Slippery Surfaces, MAGSS*) per poi passare al controllo attivo attraverso le oscillazioni, l'*elettro-wetting* e il *magneto-wetting*.

1.1 Controllo passivo

Il controllo passivo di una goccia sessile [1] si basa sulla modifica delle proprietà morfologiche o chimiche della superficie su cui scorre la goccia. In particolare verranno trattate tre diverse possibilità, *CHS*, *LIS* e *MAGSS*, che trovano ampie applicazioni: dalla reale riduzione dei residui alimentari in contenitori con pareti interne opportunamente trattate, alla pulizia di materiale di laboratorio e medico se rivestito con queste superfici, al risparmio energetico negli apparati di raffreddamento di impianti industriali, fino alla miniaturizzazione di laboratori per fare analisi mediche (*Lab-On-A-Chip*).

Il controllo passivo viene sfruttato su gocce che scorrono su un piano inclinato, dove l'unica forza attiva è quella di gravità, cioè la più semplice da utilizzare. Su un piano inclinato, il moto della goccia avviene per piccoli angoli di inclinazione se essa non esibisce isteresi dell'angolo di contatto, cioè se la differenza tra l'angolo di avanzamento e quello di ritiro è circa zero, anche se gli angoli di contatto sono molto piccoli. Nel caso di gocce sessili è presente un sistema con tre tipologie di interfacce: goccia-aria, goccia-*LIS* e aria-*LIS* e l'angolo di contatto della goccia è il risultato della somma delle tre interazioni.

a. CHS Chemically Heterogeneous Surface

Un sistema modello di superficie *CHS* consiste in una sequenza di strisce micrometriche di differente bagnabilità (liofile e liofobiche), come si vede in Figura 1.1, che introduce un comportamento anisotropo: se le gocce scorrono attraverso le strisce esse hanno un cambiamento periodico dell'angolo di contatto e quindi una fluttuazione della velocità, mentre se la goccia scorre parallela alle strisce la velocità non muta. Si possono utilizzare *CHS* formate da domini di differenti forme e combinati in maniera diversa per guidare il moto della goccia. Questi due fattori possono influenzare la statica (angolo di contatto) e la dinamica (velocità media). Nel campo della microfluidica

[2] si può cambiare la dinamica di emulsioni di olio in acqua attraverso un patterning eterogeneo delle pareti del capillare di vetro. Le *CHS* sono ghiaccio-fobiche [3,4] e possono controllare la condensazione super raffreddata e la geometria e la crescita di ghiaccio all'interno delle gocce. Si possono disporre superfici idrofile con isole idrofobe per prevenire la formazione di strati di vapore isolante.

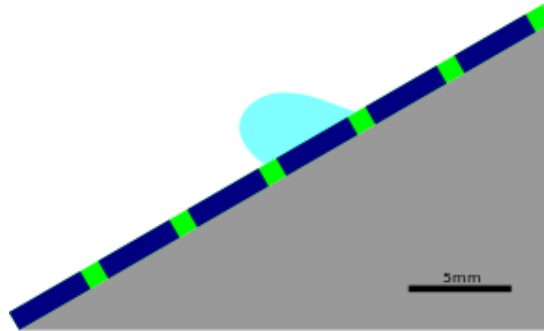


Figura 1.1- Goccia che scorre su una superficie, inclinata su cui si alternano strisce idrofobiche a strisce idrofile.

b. LIS Lubricant Impregnated Surface

Sono superfici che cercano di riprodurre le caratteristiche del peristoma della pianta carnivora *Nepenthes* [1]: il peristoma è impregnato da un film di liquido oleoso e gli insetti che lo toccano scivolano verso il basso, dove vengono mangiati. In Figura 1.2 è rappresentato un esempio artificiale della struttura della sua superficie. In Figura 1.3 si vede la riproduzione fabbricata in laboratorio: una texture di colonne micrometriche in cui viene intrappolato del lubrificante, generalmente oli siliconici o fluorurati, in modo che una goccia di un altro liquido galleggi su questo substrato misto. Sulle LIS la goccia inizia il movimento per angoli di inclinazione molto piccoli, indipendentemente dalla spaziatura tra i post o dalla viscosità dell'olio, poiché una superficie liquida è esente da difetti morfologici o chimici che agiscono da centri di *pinning* della linea di contatto della goccia. Inoltre il film di lubrificante ha una funzione di rivestimento autoriparante che rapidamente ristabilisce il funzionamento liquido-repellente dell'olio in caso di danni o abrasioni al materiale poroso. Se la LIS è sottoposta all'azione di flussi esterni, esiste una lunghezza finita oltre alla quale il lubrificante non può essere rimosso dalla texture. Le LIS possono essere ghiaccio-fobiche [3,4] e sono efficaci nel rimuovere i biofilm [5] da apparecchiature mediche o di laboratorio e riducono così il rischio di infezioni batteriche.



Figura 1.2- Esempio teorico di LIS: goccia (in azzurro) sospesa su olio (in giallo).

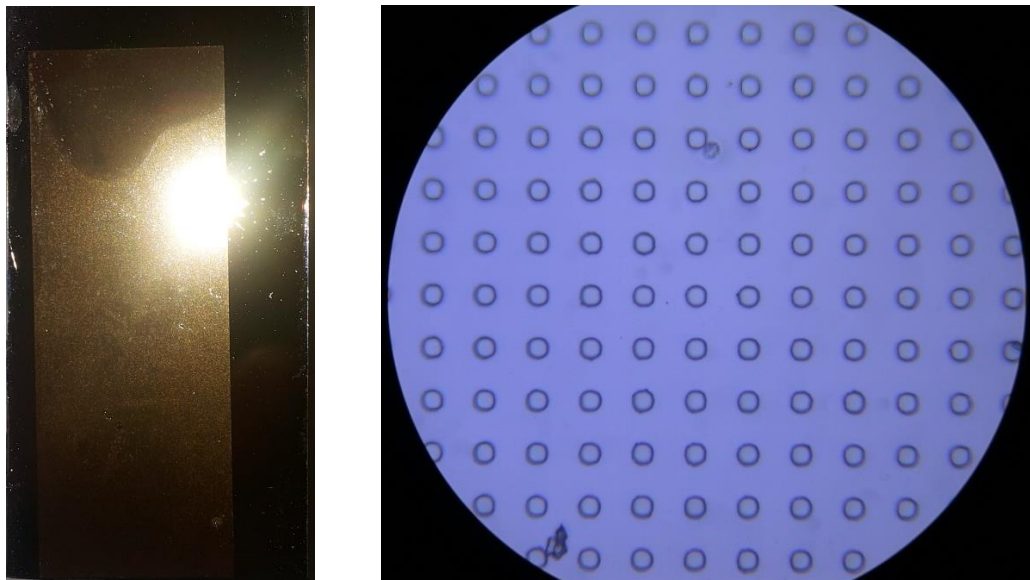


Figura 1.3- A sinistra esempio di LIS: si vede il rettangolo più chiaro che corrisponde alla texture di SU8 all'interno del wafer di Silicio. A destra si possono vedere al microscopio i pillar di SU8 disposti in modo regolare secondo la maschera applicata.

c. MAGSS Magnetic Slippery Surface

Come si vede in Figura 1.4, si può realizzare una superficie liquida ricoprendo con uno strato di ferrofluido una parete dove è presente un campo magnetico prodotto da magneti posti al di sotto della superficie [6]. Essi sono disposti in modo tale da avere gradiente non nullo che permette al ferrofluido di aderire alla superficie e di rimanere ancorato anche sotto l'azione di un flusso esterno. Questa conformazione funziona da *LIS* e quindi acquisisce tutti i suoi vantaggi. Una possibile applicazione delle *MAGSS* è negli impianti di raffreddamento in cui il vapore acqueo condensa sulle pareti del tubo: basterebbe applicare il ferrofluido sulla zona interessata e le gocce di condensa scorrerebbero via.

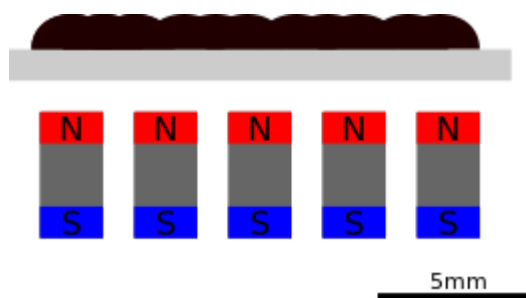


Figura 1.4-Principio teorico delle MAGSS.

1.2 Controllo attivo

Se si introduce una forza diversa dalla gravità, e che si può controllare, è possibile cambiare attivamente il moto della goccia. Le gocce possono essere prodotte in gran quantità e velocemente e possono essere utilizzate come vettori che trasportano materiale bio-chimico da un sito a un altro per effettuare una reazione oppure si può creare un circuito formato da porte logiche. Le possibili alternative per avere un controllo attivo di gocce sono oscillazioni meccaniche, *elettro-wetting* e *magneto-wetting*.

a. Oscillazioni

Se si posiziona una goccia su un piano inclinato, su cui è libera di scorrere, il suo moto può essere manipolato dalle vibrazioni verticali del piano [7]. La goccia, in base all' accelerazione verticale (fino a 10-20 g) e alla frequenza di oscillazione del piano, può aumentare la velocità di discesa, può essere fermata e può perfino essere fatta risalire con delle velocità controllate.

b. Elettro-wetting

Come si vede in Figura 1.5 la goccia è posta tra due elettrodi e i suoi angoli di contatto possono essere modificati in base al potenziale applicato [8]. Se è presente un *patterning* di strisce millimetriche di diversi elettrodi, esso introduce un comportamento anisotropo: se le gocce scorrono attraverso le strisce esse hanno un cambiamento periodico dell'angolo di contatto e quindi una fluttuazione della velocità.

c. Magneto-wetting

Si mette una goccia di ferrofluido su una superficie come in Figura 1.5, e si posiziona al di sotto un magnete permanente [9,10]. Il movimento del magnete provocherà il movimento del ferrofluido e quindi la goccia potrà essere controllata completamente.

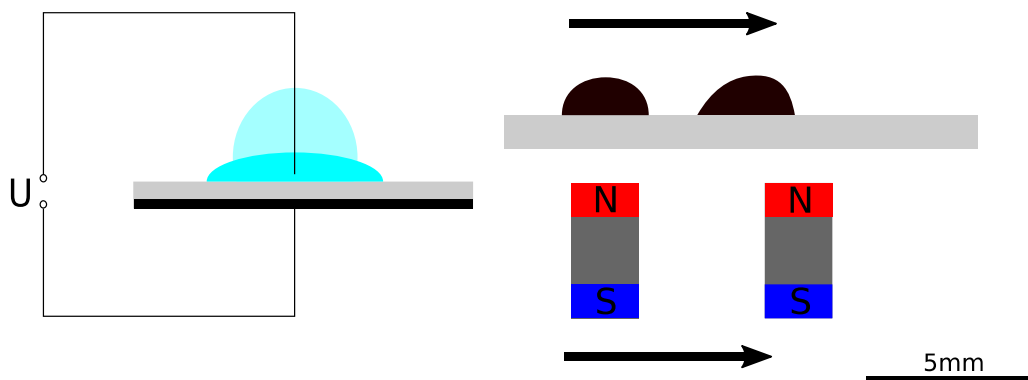


Figura 1.5- A sinistra esempio schematico di elettro-wetting: cambiamento dell'angolo di contatto a seguito dell'azione del potenziale elettrico. A destra esempio schematico di magneto-wetting: spostamento della goccia di ferrofluido causato dal magnete.

CAPITOLO 2

Apparato sperimentale

L'apparato di misura è stato assemblato per visualizzare il moto di scivolamento di gocce immerse in un campo magnetico variabile. E' costituito da un elettromagnete, da una fast camera per l'acquisizione dell'immagine, dal substrato dove scorre la goccia e dal ferrofluido preso in esame.

2.1 Elettromagnete

L'elettromagnete, in Figura 2.1, è formato da due espansioni cilindriche di materiale ferromagnetico con bassa isteresi, una bucata al centro e una piena, che terminano con un cono troncato. Le espansioni sono circondate da delle spire in cui scorre la corrente che induce il campo magnetico tra le due espansioni.

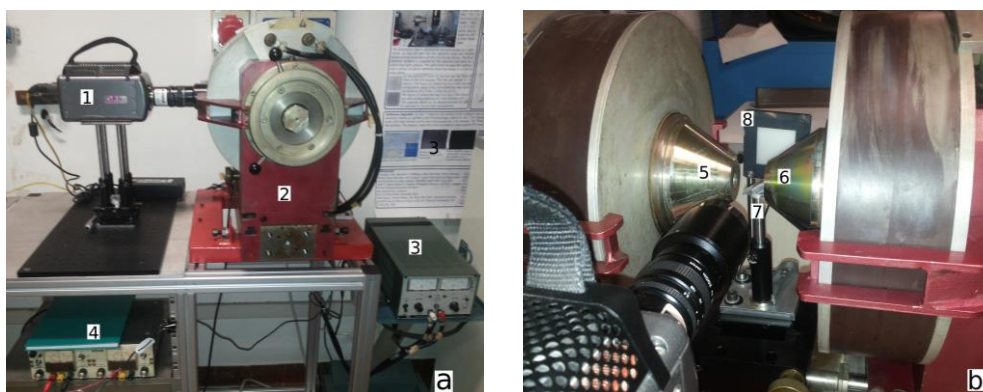


Figura 2.1-Fotografia complessiva dell'apparato sperimentale a1) Fast camera; a2) Elettromagnete; a3) Amperometro; a4) Alimentatore led; b5) Espansione bucata; b6) Espansione piena; b7) Cuneo in alluminio; b8) Led.

Il campo magnetico prodotto è stato caratterizzato da misure sistematiche fatte con un Gaussmetro. Sono state fatte misure del campo magnetico parallelo all'asse tra le espansioni in funzione della corrente immessa e di (x,y,z) che vengono confrontate con la simulazione del sistema attraverso il programma Comsol, come si vede in Figura 2.2. Si può vedere che gli andamenti globali del campo reale sono “simili” a quelli del campo simulato, soprattutto al centro e vicino all'espansione piena, che sono le zone d'interesse. Poiché la precisione della sonda è limitata alla sua dimensione di 3mm e nei punti specifici d'indagine serve una precisione migliore, nei calcoli dei gradienti del campo magnetico è stata utilizzata la simulazione.

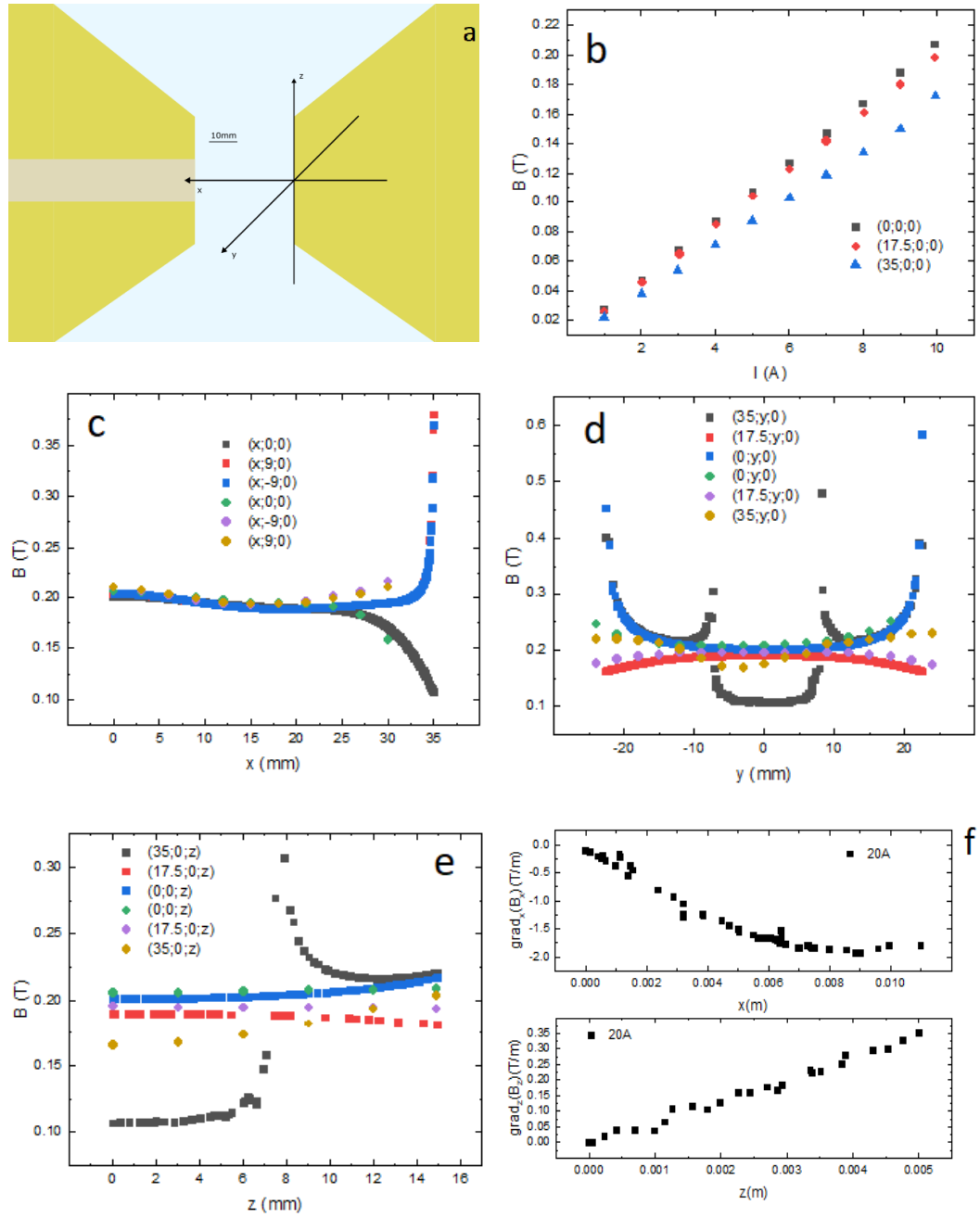


Figura 2.2- Caratterizzazione del campo magnetico prodotto dall'elettromagnete: a) Sistema di riferimento tra le due espansioni; b) Campo magnetico in funzione della corrente in tre posizioni diverse; c) Confronto tra campo magnetico reale ("cerchio") e simulato ("quadrato") in funzione della posizione x con $I=9.95$ A; d) Confronto tra campo magnetico reale ("cerchio") e simulato ("quadrato") in funzione della posizione y con $I=9.95$ A; e) Confronto tra campo magnetico reale ("cerchio") e simulato ("quadrato") in funzione della posizione z con $I=9.95$ A; f) Esempio di gradienti del campo magnetico nella zona di indagine.

2.2 Ferrofluido

Il ferrofluido utilizzato è una sospensione acquosa stabile di maghemite con formula $\gamma\text{-FeO}_3$ [10]. Il composto è stato preparato partendo da una soluzione di idrossido di ammonio NH_4OH (1L) aggiunta a una mistura di cloruro ferrico FeCl_3 (0.9mol) e cloruro ferroso FeCl_2 (1.8mol) per ottenere nanoparticelle di magnetite. Queste vengono ossidate in maghemite aggiungendo una soluzione di nitrato ferrico $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ (800mL, 1.3mol) e riscaldando a 80°C per 30 minuti. Le nanoparticelle vengono poi lavate e messe in sospensione in una soluzione di acido nitrico HNO_3 (360mL, 2mol). In questa soluzione acida le nanoparticelle sono caricate positivamente e vengono controbilanciate dagli ioni negativi di NO_3 . Il ferrofluido ha una concentrazione maggiore se viene sottoposto a dialisi in una vasca in cui si usa come contrasto una soluzione di acido nitrico contenente glicole polietilenico. Dopo la dialisi la concentrazione del ferrofluido è di 7.5 mol/L. Le nanoparticelle così prodotte hanno diametro cristallino di circa 8.5nm.

Nelle varie misure sono stati utilizzate due tipologie di ferrofluido:

- FFD64 con concentrazione 0.8M;
- FFD110 con concentrazione 1.1M.

Le prime misure esplorative sono state fatte con il FFD64 e poi sono state continuate con FFD110. Le concentrazioni sono diverse per avere la stessa interazione magnetica.

2.3 Substrato

Il substrato dove scorre la goccia è costituito da un wafer di Silicio su cui è stata fabbricata la *LIS* [11]. E' stata scelta una superficie del genere poiché si è rivelata la migliore per far scorrere gocce in generale [1]. La *LIS* è stata prodotta in camera pulita. La produzione inizia con wafer di Silicio che vengono tagliati della forma (rettangolare) voluta. Vengono puliti con acetone e isopropanolo e infine inseriti nel plasma. I wafer puliti vengono ricoperti da SU2025, un surface primer che favorisce l'adesione della fotoresina e messi nello *Spin Coater* per avere come rivestimento un film sottile. I wafer sono esposti a luce ultravioletta per attivare la fotoresina e successivamente vengono messi su una piastra preriscaldata a 90°C per 5 minuti. I wafer raffreddati vengono ricoperti di SU8 e messi nello *Spin Coater*. In seguito vengono messi su una piastra preriscaldata a 30°C e si aumenta la temperatura fino a raggiungere i 75°C , per poi lasciare i wafer sulla piastra per 15 minuti. I wafer vengono ricoperti da una maschera in base al tipo di pattern di pillar che si vuole realizzare sulla superficie e poi vengono esposti alla radiazione ultravioletta per attivare l'SU8. Il pattern risultante si può vedere in Figura 1.3. In seguito vengono messi su una piastra preriscaldata a 65°C per 2 minuti e poi si spostano su un'altra piastra

preriscaduta a 90°C per 5 minuti. Dopo un giorno i wafer vengono cotti nuovamente per 25 minuti a 200° e poi silanizzati per un giorno. Sopra la texture viene depositato un film di Silano che rende il pattern idrofobico. La Figura 1.3 mostra il risultato finale. Successivamente la *LIS* viene impregnata di olio fluorurato (Fomblin) con viscosità 64 cSt (Stokes) attraverso un *Dip Coater*.

2.4 Protocollo di misura

Prima di ogni misura, le espansioni vengono foderate con Parafilm per evitare che si sporchino e successivamente ricoperte con un foglio di carta da filtro bagnata per mantenere l'atmosfera umida e ridurre al minimo l'evaporazione delle gocce. In Figura 2.4 si può vedere lo schema minimale per ogni misura. Il substrato è stato posizionato su un vetrino attaccato a un cuneo di alluminio con un angolo di 30°. La goccia di ferrofluido viene depositata attraverso una siringa. Il volume della goccia è stato scelto di 5 μ L poiché si possono comunque vedere gli effetti del campo magnetico ma con un percorso della goccia più lungo e un effetto misurabile secondo i tempi di misura (secondi). Per lo studio della dinamica delle gocce è stata utilizzata una fotocamera veloce Phantom v7.3 2 montante un obiettivo telecentrico macro Navitar 700. La sua risoluzione massima è 800x600 pixel e il massimo frame rate è di 6688 fps. La fotocamera è posizionata su un movimentatore per regolare meglio il fuoco e la posizione di ripresa. Per ottenere contrasto e luminosità necessari all'acquisizione, l'oggetto ripreso è retroilluminato da luce LED. Il video ripreso dalla fotocamera veloce viene convertito in immagini attraverso il programma ImageJ. Le immagini vengono poi processate da un programma di LabWIEV, che riconosce e interpola i profili destro e sinistro della goccia e permette l'estrapolazione dell'angolo di contatto e dei punti di contatto destro e sinistro. Quindi abbiamo l'evoluzione temporale della posizione della goccia. Questo software di analisi è stato scritto dal Dr. Chiarello [12].

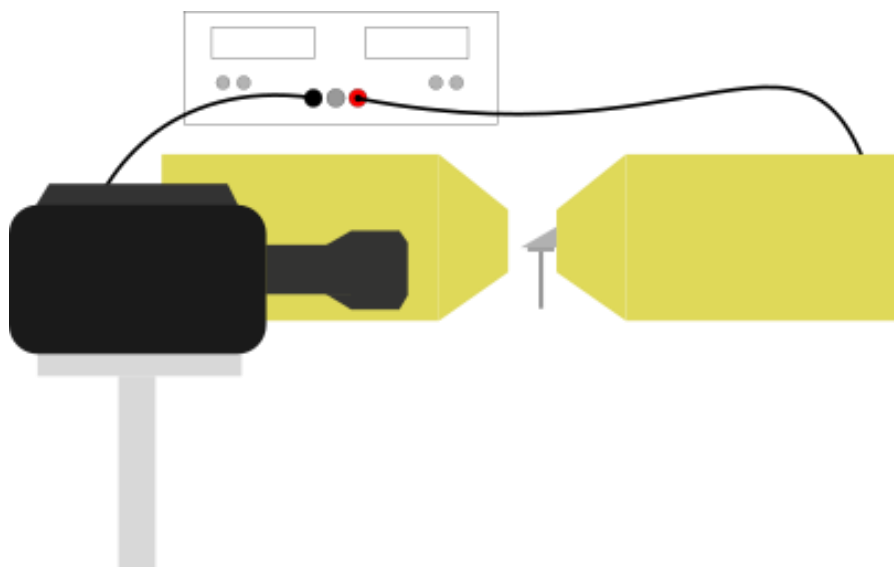


Figura 2.3 - Illustrazione dell'apparato minimale: amperometro (*sopra*) permette di controllare il campo magnetico tra le due espansioni (*al centro*) e quindi sul cuneo (*tra le due espansioni*). A *sinistra* la telecamera.

CAPITOLO 3

Risultati sperimentali

In questo capitolo verranno elencati i risultati preliminari ottenuti dalle misure effettuate in 3 diverse configurazioni per avere un'immagine complessiva del comportamento del sistema. Le posizioni sono: *LIS* posizionata su un piano e la goccia che subisce solo la forza magnetica, *LIS* posizionata sul piano inclinato con lo spigolo appoggiato all'espansione piena e la goccia subisce forza magnetica e di gravità, e infine *LIS* posizionata sul piano inclinato con la faccia appoggiata all'espansione piena e la goccia subisce forza magnetica e di gravità. Nel primo paragrafo verranno esaminati i risultati ottenuti per gocce di soluzione di acido nitrico che scorrono sul piano inclinato, per avere una velocità base di confronto. Verrà esaminato come varia la velocità della goccia in base alla posizione di deposito e al campo magnetico esterno. Poi verrà esaminato il bilancio delle forze in alcuni punti sul piano inclinato dove la goccia non si muove.

3.1 Misure con acido nitrico

Per avere una velocità di confronto con le misure successive, è stata fatta una prova con gocce di una soluzione di acido nitrico HNO_3 (360mL, 2mol) di volume $5\mu\text{L}$ sul piano inclinato di 30° . La soluzione di acido nitrico si può pensare come un “ferrofluido” con concentrazione 0 M poiché è la base della soluzione del ferrofluido. Nel grafico in Figura 3.1 sono presenti cinque misure della velocità delle gocce. Come velocità di riferimento è stata presa la media pesata del campione, ma sono state eliminate la prima e l'ultima misura essendo incompatibili con le altre.

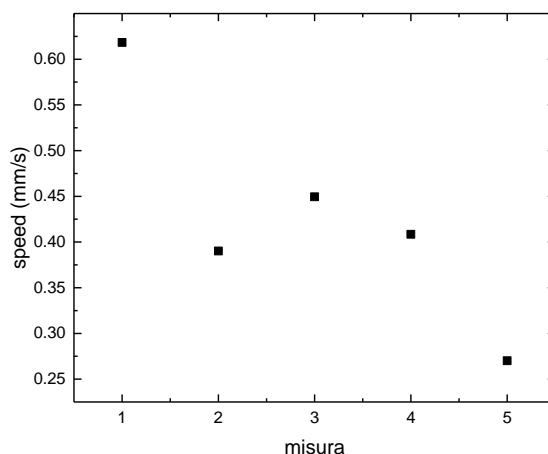


Figura 3.1- Velocità delle gocce di soluzione di acido nitrico.

La velocità di confronto è $v_0=0.41\pm0.03$ mm/s. Nei seguenti paragrafi verrà inserita nei grafici come misura a 0A, 0M, per avere un raffronto immediato.

3.2 Misure lungo il piano orizzontale

Per capire come si comporta la goccia in mezzo alle due espansioni si parte dal caso più semplice dove l'unica forza in gioco è quella esercitata dal campo magnetico. In Figura 3.2.a viene mostrata la configurazione di misura, in cui viene fatta variare la posizione di deposito della goccia sul piano (in giallo è indicato il sistema vetrino + *LIS*). È stata definita una nuova variabile d_p che rappresenta la posizione di deposito della goccia lungo la *LIS* ($d_p=0\text{mm}$ rappresenta l'inizio della texture della *LIS*, mentre $d_p=10\text{mm}$ rappresenta la fine).

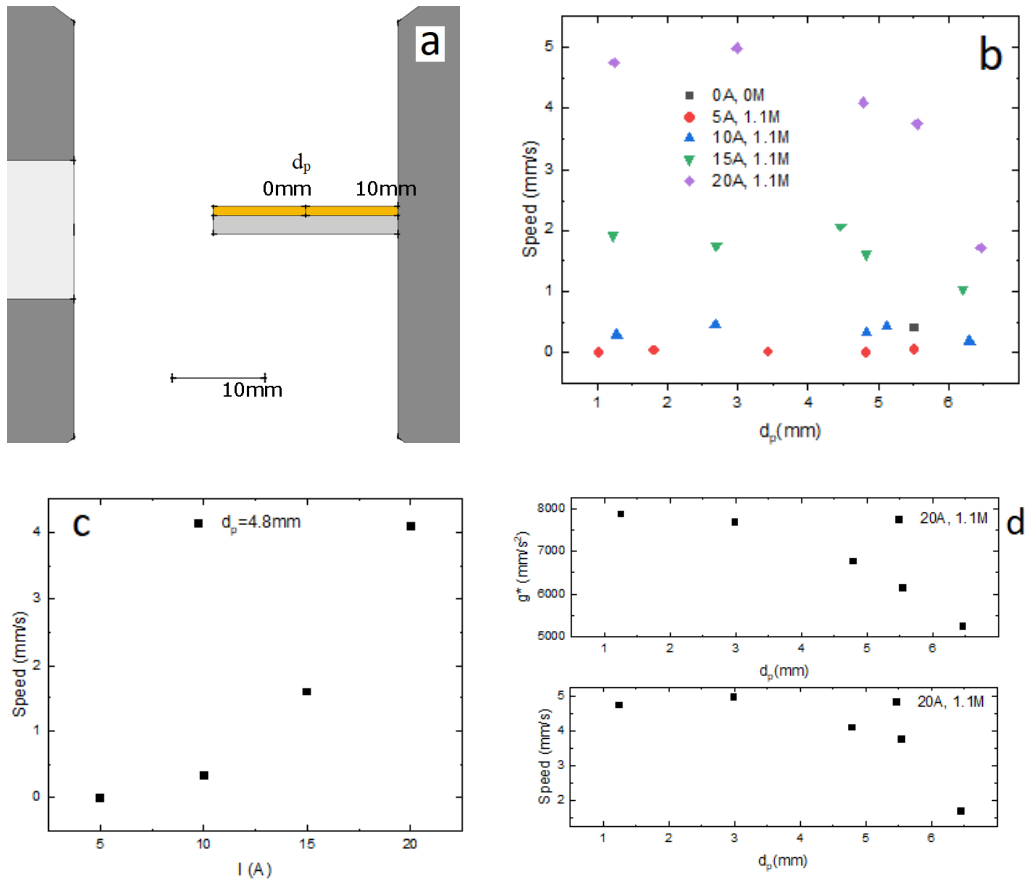


Figura 3.2- a) Configurazione utilizzata per la misura; b) Velocità delle gocce per differenti posizioni di deposito lungo x e per diverse correnti immesse; c) Velocità delle gocce per differenti correnti applicate ma uguali posizioni di deposito; d) Confronto tra l'andamento della forza magnetica (rinormalizzata) e la velocità della goccia a 20A.

Nel grafico in Figura 3.2.b sono riportate le velocità di gocce di ferrofluido con concentrazione 1.1M per diverse posizioni di deposito e diverse correnti. Si può notare un trend costante per la velocità delle gocce a 5A, 10A e 15A. La Figura 3.2.c mostra la velocità di gocce di ferrofluido depositate alla distanza $d_p=4.8\text{mm}$ al variare della corrente dell'elettromagnete. È evidente la crescita superlineare della velocità con la corrente e quindi con il campo magnetico. Per capire più a fondo le cause della dinamica della goccia è stato

calcolato il contributo della forza magnetica (rinormalizzata con la densità del ferrofluido) $g^* = g_x^* = \frac{M_x \nabla_x B_x \mu_r}{\rho}$ (in questo caso è presente solo il contributo lungo x) che è stata calcolata trovando la magnetizzazione $M_x = \frac{B_x M_{sat}}{(B_x + M_{sat}/\chi)}$ e il gradiente lungo x della componente x del campo magnetico. I parametri μ_r (permeabilità magnetica), ρ (densità), M_{sat} (magnetizzazione di saturazione) e χ (susceptività magnetica) dipendono dalla tipologia di ferrofluido, mentre M , B e ∇B sono stati calcolati grazie alle simulazioni Comsol nei vari punti di deposito della goccia. In Figura 3.2.d vengono confrontati i contributi di g^* e della velocità della goccia negli stessi punti di deposito, per una corrente di 20A. Come previsto l'aumento osservato di velocità con la distanza dall'espansione è dovuto all'aumento della forza magnetica legata principalmente all'andamento del gradiente del campo magnetico.

Successivamente è stata fatta un'altra misura in cui viene variata l'altezza del piano mentre la goccia viene depositata sempre nello stesso punto $d_p=4.6\text{mm}$. In Figura 3.3 si può vedere l'andamento della velocità della goccia in funzione dell'altezza del piano, in relazione al sistema di riferimento visto in Figura 2.2.

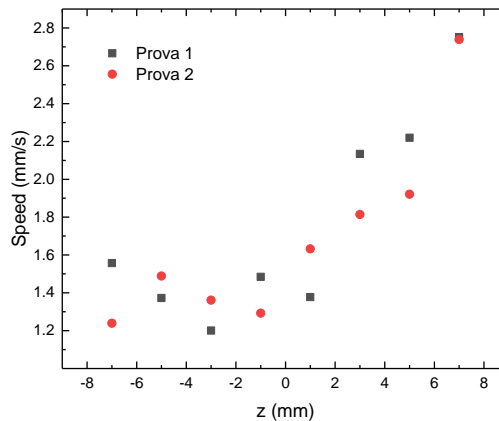


Figura 3.3- Velocità della goccia in funzione della posizione z del piano.

Il grafico in Figura 3.3 indica un andamento crescente lungo z della velocità: questo è dovuto all'andamento crescente del modulo del campo lungo z che contribuisce ad un aumento della magnetizzazione e del gradiente lungo x della componente x del campo magnetico. Questo produce un aumento della forza magnetica agente sulla goccia.

3.3 Misure lungo il piano inclinato

Le misure sul piano inclinato sono state fatte in due diverse configurazioni: con il cuneo con lo spigolo appoggiato all'espansione piena e con il cuneo con la faccia appoggiata all'espansione piena. Sono state scelte per esplorare i casi di un moto con la goccia che si allontana dall'espansione e un moto con la goccia che si avvicina all'espansione.

3.3.1 Spigolo appoggiato all'espansione

In questo caso la LIS è stata disposta sul cuneo con lo spigolo appoggiato all'espansione piena. La configurazione in Figura 3.4.a è stata pensata per vedere come si comporta una goccia di ferrofluido che si avvicina all'espansione dell'elettromagnete e che è sottoposta all'azione congiunta della forza di gravità e della forza magnetica.

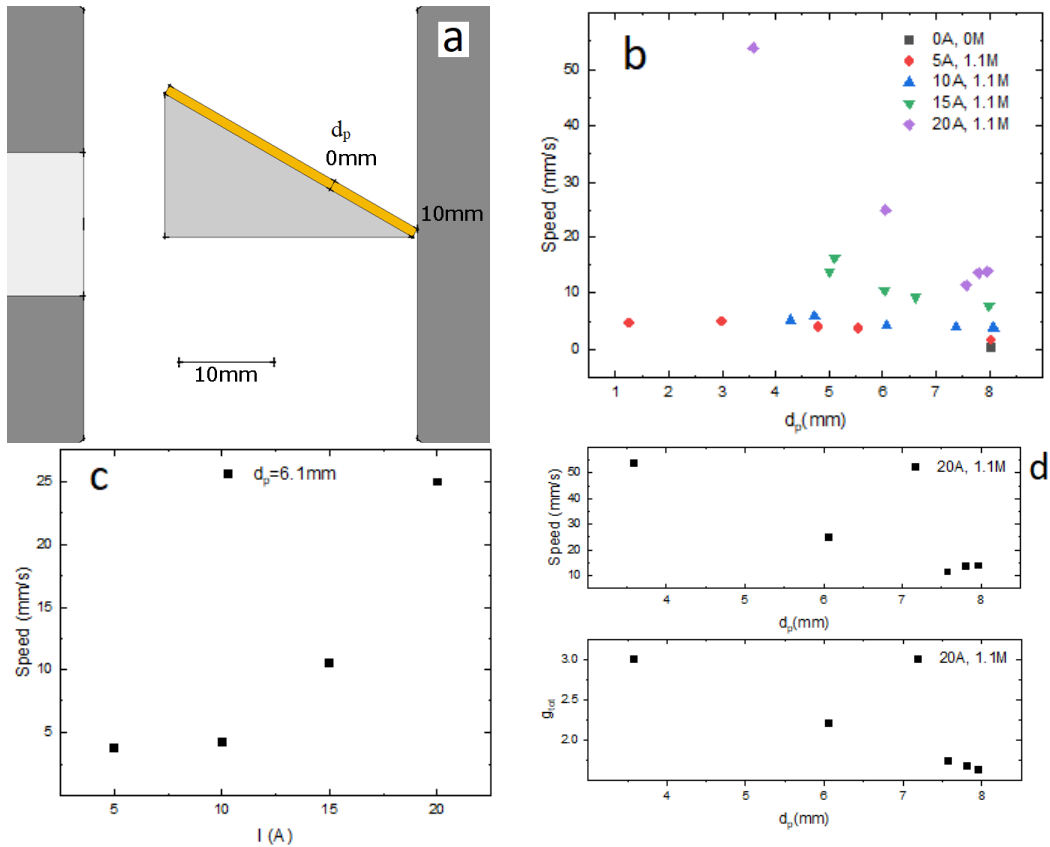


Figura 3.4- a) Configurazione utilizzata per la misura; b) Velocità della goccia in funzione della posizione di deposito per diverse correnti immesse; c) Velocità delle gocce per differenti correnti applicate ma uguali posizioni di deposito; d) Confronto tra l'andamento del rapporto g_{tot} e la velocità della goccia a 20A.

Nel grafico in Figura 3.4.b sono riportate le velocità di gocce di ferrofluido con concentrazione 1.1M per diverse posizioni di deposito e diverse correnti. Si può notare un trend costante per la velocità delle gocce a 5A, 10A e 15A e in modulo maggiore rispetto alla velocità di riferimento v_0 , quindi il contributo della forza totale applicata è maggiore rispetto a quello della forza

di gravità sul piano inclinato. La Figura 3.4.c mostra la velocità di gocce di ferrofluido depositate alla distanza $d_p=6.1\text{mm}$ al variare della corrente dell'elettromagnete. È evidente la crescita superlineare della velocità con la corrente e quindi con il campo magnetico. Per capire più a fondo le cause della dinamica della goccia è stato calcolato il bilancio tra forza magnetica (rinormalizzata) e forza di gravità lungo il piano inclinato $g_d = g_{||} + g_{||}^* = g \sin(\alpha) + g_x^* \cos(\alpha)$ ed è stato messo in rapporto con il solo contributo della forza di gravità: $g_{\text{tot}} = \frac{g_d}{g_{||}}$. In questo caso è presente anche un contributo del gradiente lungo z della componente z del campo magnetico, ma è stato trascurato poiché il contributo lungo x della componente x del campo è dominante, come si vede in Figura 2.2.f. In Figura 3.4.d vengono confrontati i contributi di g_{tot} e della velocità della goccia negli stessi punti di deposito, per una corrente di 20A. Si vede che i valori di g_{tot} sono tutti maggiori di 1 e questo indica che la forza applicata sulla goccia è maggiore della singola forza di gravità. Come previsto l'aumento osservato di velocità con la distanza dall'espansione è dovuto all'aumento della forza magnetica legata principalmente all'andamento del gradiente del campo magnetico.

3.3.2 Faccia appoggiata all'espansione

In questo caso la *LIS* è stata disposta sul cuneo con la faccia appoggiata all'espansione piena come si vede in Figura 3.5.a. La configurazione è stata pensata per vedere come si comporta una goccia di ferrofluido che si allontana dall'espansione dell'elettromagnete e che è sottoposta all'azione congiunta della forza di gravità e della forza magnetica.

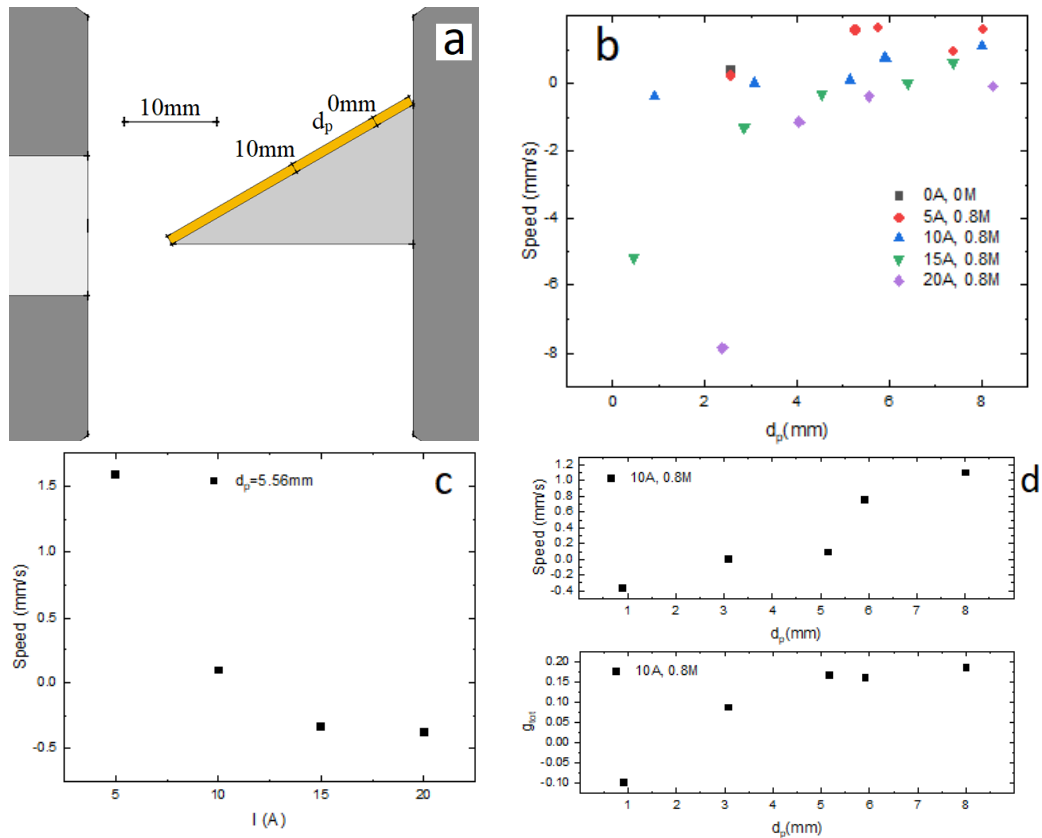


Figura 3.5- a) Configurazione utilizzata per la misura; b) Velocità della goccia in funzione della posizione di deposito per diverse correnti immesse; c) Velocità delle gocce per differenti correnti applicate ma uguali posizioni di deposito; d) Confronto tra l'andamento del rapporto g_{tot} e la velocità della goccia a 10A.

Il grafico in Figura 3.5.b sono riportate le velocità di gocce di ferrofluido con concentrazione 0.8M per diverse posizioni di deposito e diverse correnti. Si mostra che la velocità v_0 non ha un valore maggiore della velocità della goccia di ferrofluido in tutte le posizioni. La Figura 3.5.c mostra la velocità di gocce di ferrofluido depositate alla distanza $d_p = 5.56$ mm al variare della corrente dell'elettromagnete. È evidente che la velocità della goccia decresce con l'aumentare della corrente e quindi con il campo magnetico, fino a cambiare di segno (risalita del cuneo). Questo potrebbe indicare che la forza magnetica aumenta, con l'aumentare della corrente, e nei casi di velocità negativa essa supera la forza di gravità agente sulla goccia e risale il piano. Per capire maggiormente le cause della dinamica della goccia è stato calcolato il bilancio tra forza magnetica e forza di gravità lungo il piano

inclinato $g_d = g_{||} + g_{||}^* = g \sin(\alpha) - g^*$, dove $g^* = \sqrt{g_x^{*2} + g_z^{*2}}$ ed è stato messo in rapporto con il solo contributo della forza di gravità: $g_{tot} = \frac{g_d}{g_{||}}$. In questo caso la forza magnetica è stata calcolata come la composizione della componente lungo x e della componente lungo z poiché la risultante è parallela al piano inclinato. In Figura 3.5.d vengono confrontati i contributi di g_{tot} e della velocità della goccia negli stessi punti di deposito, per una corrente di 10A. Si vede che i valori di g_{tot} variano da negativi, punti in cui la forza magnetica è maggiore di quella gravitazionale, a positivi, in cui la forza di gravità è maggiore di quella magnetica. Come previsto la velocità ha valori positivi negli stessi punti dove g_{tot} è positiva, quando la goccia scende il piano inclinato, e ha valori negativi negli stessi punti dove g_{tot} è negativa, quando la goccia scende il piano inclinato.

Nei casi di velocità pari a zero la forza magnetica è in equilibrio con la forza di gravità. In questi punti di equilibrio, in Tabella 3.1, si può calcolare il contributo della forza magnetica sulla goccia: attraverso la simulazione di Comsol si possono trovare i valori del campo magnetico, e quindi calcolare il valore della magnetizzazione e del gradiente del campo magnetico nel punto esatto. Poi la forza magnetica viene confrontata con la proiezione della forza di gravità lungo il piano.

Prima misura				
I	$d_p \pm \sigma_{d_p}$	$g_{ }^* \pm \sigma_{g_{ }^*}$	$g_{ }$	compatibilità
A	mm	m/s ²	m/s ²	
10	3.1±0.2	4.5±0.4	4.9	1.92
15	6.4±0.2	6.1±0.5	4.9	2.22
20	8.3±0.2	6.4±1.2	4.9	1.25
Tabella 3.1- Punti di equilibrio del ferrofluido e confronto tra contributo magnetico (g^*) e contributo gravitazionale (g).				

Successivamente la misura è stata ripetuta ma cercando di avere la goccia che scorresse nella zona più vicina al centro dell'espansione.

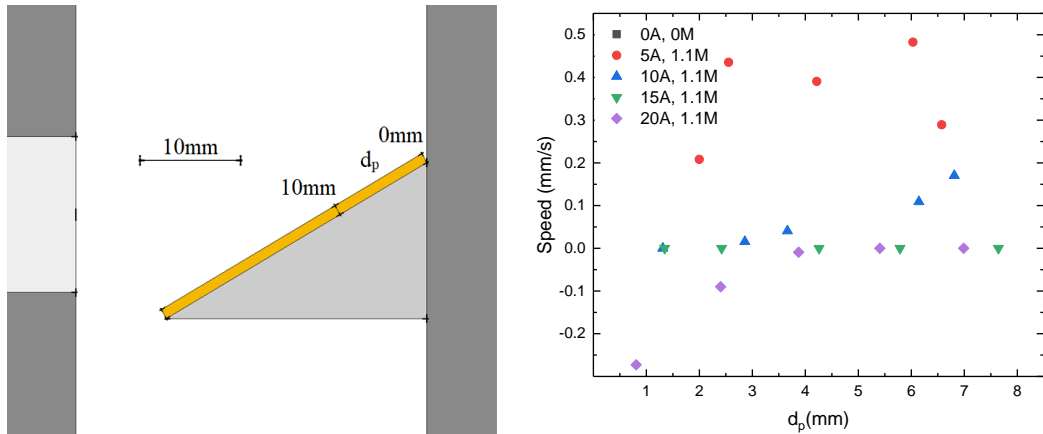


Figura 3.6- A sinistra: configurazione utilizzata per la misura. A destra: Velocità della goccia in funzione della posizione di deposito per diverse correnti immesse.

Il grafico in Figura 3.6 mostra che la velocità v_0 è maggiore rispetto alla velocità della goccia con il campo acceso, quindi, come già visto nella prima misura, la forza magnetica ha un effetto di resistenza sulla goccia di ferrofluido. Si può notare che il caso più interessante è per corrente pari a 15A: è presente una zona tra le due espansioni in cui indipendentemente dalla posizione di deposito della goccia, essa risulta sempre ferma. Sono quindi stati confrontati i contributi della forza magnetica e della forza di gravità in Tabella 3.2.

Seconda misura			
$d_p \pm \sigma_{d_p}$	$g_{ }^* \pm \sigma_{g_{ }^*}$	$g_{ }$	compatibilità
mm	m/s ²	m/s ²	
1.4±0.2	3.9±0.2	4.9	5.25
2.4±0.2	3.6±0.3	4.9	4.69
4.3±0.2	4.2±0.4	4.9	1.78
5.8±0.2	4.2±0.7	4.9	1.05
7.6±0.2	4.1±1.1	4.9	0.73
Tabella 3.2- Punti di equilibrio del ferrofluido e confronto tra contributo magnetico (g^*) e contributo gravitazionale (g) per 15A.			

I valori di g^* riportati in Tabella 3.2 sono tutti inferiori alla proiezione della forza di gravità. La differenza potrebbe essere dovuta a un contributo di attrito statico presente tra olio della LIS e ferrofluido.

Conclusioni

Lo scopo principale di questo lavoro di tesi ha riguardato lo studio del moto di gocce di ferrofluido sotto l'influenza di un campo magnetico variabile e controllato, prodotto da un elettromagnete. Lo studio è stato rivolto a gocce di 5 μ L di una soluzione di ferrofluido composto da maghemite e acido nitrico. Le variabili dell'indagine sono state la configurazione del sistema dove veniva disposta la *LIS* (orizzontale o inclinato), la posizione del sistema rispetto all'espansione dell'elettromagnete, la posizione di deposito della goccia sulla *LIS* e l'intensità del campo magnetico generato dall'elettromagnete. L'analisi è iniziata con la superficie orizzontale per capire meglio l'azione isolata della forza magnetica e si è passati al piano inclinato. Nella prima prova sul piano inclinato con la faccia rivolta verso l'espansione sono stati osservati tre diversi fenomeni: discesa, risalita e immobilità della goccia. In questo caso è interessante vedere che si può controllare il moto della goccia semplicemente cambiando l'intensità del campo magnetico ma resta il fatto che la dinamica dipende ancora da molti fattori: la posizione del sistema tra le due espansioni, la posizione di deposito della goccia e l'intensità del campo magnetico. Nella seconda prova si è riusciti a togliere una variabile da cui dipende la dinamica: nel caso dei 15A si è riscontrato che la goccia rimane ferma in ogni punto in cui è stata depositata. Inoltre dai bilanci tra la forza magnetica e la forza di gravità è stata notata una differenza tra le due, probabilmente legata alla presenza dell'attrito statico dovuto all'interazione tra la goccia di ferrofluido e l'olio della *LIS*.

L'evoluzione del lavoro sarà la sostituzione dell'espansione bucata con un'altra piena per avere un campo magnetico uniforme e vedere se è possibile avere il controllo della dinamica della goccia semplicemente cambiando il verso del campo magnetico. L'obiettivo finale è riuscire a controllare la dinamica della goccia agendo solo sulla corrente dell'elettromagnete.

Bibliografia

- [1] Giampaolo Mistura e Matteo Pierno *Drop mobility on chemically heterogeneous and lubricant-impregnated surfaces*. Advances in Physics: X, **2**, 591-607 (2017).
- [2] Aritra Ghosh et al. *Wettability patterning for high-rate, pumpless fluid transport on open, non-planar microfluidic platforms*. Lab Chip, **14**, 1538-1550 (2014).
- [3] Jonathan B. Boreyko et al. *Controlling condensation and frost growth with chemical micropatterns*. Scientific Reports, **6**, 19131 (2016).
- [4] Philseok Kim et al. *Liquid-Infused Nanostructured Surfaces with extreme anti-ice and anti-frost performance*. Acs Nano **6**, 6569–6577 (2012).
- [5] Jiaxuan Chen et al. *An immobilized liquid interface prevents device associated bacterial infection in vivo*. Biomaterials, **113**, 80-92 (2017).
- [6] Peyman Irajizad et al. *Magnetic slippery extreme icephobic surfaces*. Nature Communications, **7**, 13395 (2016).
- [7] Paolo Sartori et al. *Drop motion induced by vertical vibrations*. New Journal of Physics, **17**, 1367-2630 (2015).
- [8] Frieder Mugele e Jean-Christophe Baret. *Electrowetting: from basics to applications*. Journal Physics: Condensed Matter, **17**, 705–774 (2005).
- [9] Nam-Trung Nguyen et al. *Magnetowetting and Sliding Motion of a Sessile Ferrofluid Droplet in the Presence of a Permanent Magnet*. Langmuir, **26**, 12553–12559 (2010).
- [10] Carlo Rigoni et al. *Static magnetowetting of ferrofluid drops*. Langmuir, **32**, 7639-7646 (2016).
- [11] Armelle Keiser et al. *Drop friction on liquid-infused materials*. Soft Matter, **13**, 6981-6987 (2017).
- [12] Enrico Chiarello. *Analisi gocce 2010: Manuale utente*. 2010.